

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210206001

动床条件下泥石流运动参数变化特征实验研究*

李炳志^{1,2,4}, 潘华利^{1,2}, 邓其娟³, 欧国强^{1,2}, 孔玲^{1,2,4}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 四川建筑职业技术学院, 四川 成都 610399; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 泥石流运动参数变化特征与泥石流流量、沟床纵坡和沟床物源物质组成等紧密相关, 准确确定泥石流运动参数变化特征对于进行流域风险评估和防治工程规划设计具有重要意义。通过室内水槽实验探索了不同来流流量、沟床纵坡和物源细粒含量条件下, 沟槽观测点处泥石流流深、流速和容重的变化情况。结果表明: 来流流量和沟床纵坡越大, 物源细粒含量越小时, 泥石流冲刷能力越强; 相同实验条件下, 流体流深与来流流量间呈正相关关系, 与细粒含量间呈负相关关系, 且流深受来流流量的影响大于细粒含量; 流体流速与来流流量和沟床纵坡间呈正相关关系, 与细粒含量间呈负相关关系, 且流速受沟床纵坡的影响最大, 受细粒含量的影响最小; 流体容重与来流流量和细粒含量间呈负相关关系, 与沟床纵坡间呈正相关关系, 且容重受沟床纵坡和细粒含量的影响大于来流流量。通过水槽实验数据对泥石流流量进行拟合, 采用流量拟合式对锅圈岩沟2013年“7·26”泥石流峰值流量进行计算, 与野外实测值对比精度高于80%。

关键词: 泥石流; 沟床侵蚀; 影响因素; 实验研究

中图分类号: TV144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0850-09

Experimental Study on Variation Characteristics of Debris Flow Movement Parameters under Movable Bed Conditions

LI Bingzhi^{1,2,4}, PAN Hualì^{1,2}, DENG Qijuan³, OU Guoqiang^{1,2}, KONG Ling^{1,2,4}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China;

3. Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu 610399, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The change characteristics of debris flow movement parameters are closely related to the discharge of debris flow, the longitudinal slope and the source composition of the gully bed. Accurate determination of the change characteristics of debris flow movement parameters is of great significance for assessing watershed risks and designing prevention engineering. Through the indoor flume experiments, the changes in flow depth, velocity and bulk density of debris flow at the observation point of the trench under the conditions of different flow rates, longitudinal slopes of the gully bed, and fine particle contents of the source composition were explored. The research results show that when the in-

* 收稿日期: 2021-02-06; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510702)、国家自然科学基金(42077275)资助

作者简介: 李炳志(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事泥石流流体力学方面研究。E-mail: lbzucas@163.com

通讯作者: 潘华利(1982—), 女, 研究员, 博士。主要从事泥石流流体力学方面研究。E-mail: hlpn@imde.ac.cn

flow rate and the longitudinal slope of the gully bed are greater, and the fine particle contents of the source composition are smaller, the scouring ability of debris flow is stronger; under the same experimental conditions, the fluid flow depth is positively correlated with the inflow rate. There is a negative correlation between the fluid flow depth and the fine particle contents. The flow depth is more deeply affected by the influx than the fine particle content; the fluid velocity is positively correlated with the influx and the longitudinal slope of the gully bed and is negatively correlated with the fine particle contents. The longitudinal slope of the bed has the greatest influence on the flow, and the flow is the least affected by fine particle contents; the fluid bulk density is negatively correlated with the influx and the fine particle contents, and positively correlated with the longitudinal slope of the gully bed. The impact of particle content on the bulk density of the debris flow is greater than that of the influx. The data of the flow rate of the debris flow was fitted through the experiment of the sink, and the peak flow of the Guoquanyangou "7.26" debris flow in 2013 was calculated using the flow fitting formula. Compared with the measured results, the fitting degree of the calculation data was found to be higher than 80%.

Keywords: debris flow; gully bed erosion; influencing factors; experimental research

引言

野外泥石流沟道中常覆盖有大量松散堆积物,流体流经堆积物时,会不断冲刷沟床,破坏沟床稳定性,致使流体运动特征不同于一般定床情况^[1-2]。泥石流运动参数变化特征与泥石流类型和体积、沟床坡度和沟床物源级配条件等紧密相关^[3-6],其直接影响着流域风险评估和防治工程的规划设计^[7]。目前,国内外学者从沟床物源起动的角度对泥石流的形成过程进行了大量研究^[8-10],而对泥石流形成后运动特征的研究相对较少。周必凡等^[12]对蒋家沟泥石流进行了流动实验,通过因次分析法探讨了蒋家沟泥石流表面流速与泥石流损失容重、泥石流容重和沟床纵坡间的关系;陈洪凯等^[13]从泥石流颗粒粒径和体积浓度角度对泥石流冲击特性进行了研究;何晓英等^[14-15]通过理论分析与室内模型实验相结合的方法,探讨了泥石流冲击特性与泥石流颗粒级配条件和浆体黏度的响应关系;J.I. Theule等^[16]通过对野外泥石流各横断面参数进行密集性调查,发现沟床纵坡是泥石流冲刷能力的重要影响因素;陈华勇等^[17]以丙烯酸树脂与乙酸乙酯混合液模拟泥石流黏性,以玻璃微珠代替泥石流颗粒,通过实验方法分析了泥石流颗粒级配对流速分布的影响。

上述研究表明,各学者对泥石流运动特征的研究大多基于一般定床情况,而自然界泥石流运动过程之中,常会和底床发生物质交换,促使泥石流运

动特征发生改变。本研究设计了考虑沟床侵蚀和坡面汇流的能够模拟泥石流从形成到演化的室内模型实验,能够更好地还原泥石流运动的真实过程。以来流流量、沟床纵坡和沟床物源细粒含量为控制变量,分析了泥石流流深、流速和容重随不同影响因素的变化特征。

1 水槽实验

1.1 实验装置

如图1所示,实验装置主要包括供水装置、沟道模拟装置和降雨模拟装置。供水玻璃水槽长200 cm,宽20 cm,高25 cm,用于给沟道模拟水槽供水;沟道模拟水槽长200 cm,宽20 cm,高45 cm,用于堆放实验物料,模拟野外泥石流沟道;供水水槽和沟道模拟水槽边壁均由厚5 mm的光滑透明玻璃组成,于沟道模拟水槽起点至100 cm处设置了不透水混凝土棱柱模型,用于防止沟槽起点处物源被快速淘蚀而形成跌坎,避免过流流体紊动剧烈;降雨模拟装置位于沟道模拟水槽正上方,降雨区域分布长度为120 cm,用于给沟道模拟水槽提供水体补充,模拟野外降雨和坡面汇流对实际沟道的水体补充。

1.2 实验物料

本文实验所用物料取自于四川省都江堰市龙池镇干家沟,物料最大粒径为 $d_{\max}=20$ mm,实验水

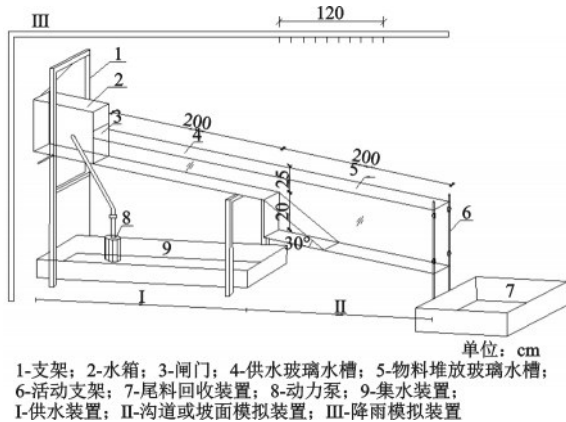


图1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment diagram

槽宽度与最大粒径比值为10,符合宽径比的要求^[18]。泥石流中细粒含量对泥石流运动特征及冲击特性具有重要影响^[19-20],本研究将颗粒粒径小于0.25 mm的颗粒视为细粒,所取物料的初始细粒含量为15%,在初始物料的基础上对物料细颗粒进行筛减,配置成细粒含量分别为6%、9%、12%和15%的4种实验样本。实验前,对各实验物料分别抽取三组样品,采用SZS型三维振筛机和Mastersizer2000激光粒度仪进行颗粒级配分析试验,得到实验物料级配曲线,如图2所示。

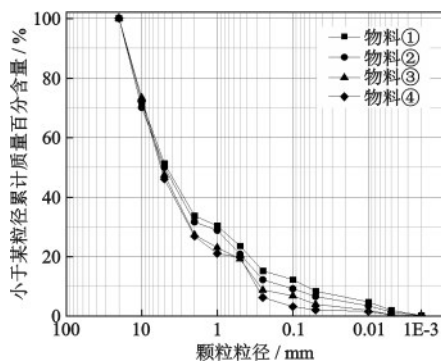


图2 实验物料颗粒级配曲线

Fig.2 Particle grading curve of experimental materials

如图3所示,实验物料堆放于沟道模拟水槽中,总堆放长度为200 cm,堆放时使物料上表面与供水水槽底面处于同一平面,实验开始前通过喷雾器向物料浇水至趋于饱和。实际泥石流沟道中,底床物源没有明显的过渡界面,为了尽可能还原泥石流运动的真实过程,本实验在水槽出口处设置了高5 cm的侵蚀基准,以消除物料与实验水槽底部明显界面的影响。侵蚀基准的设计会阻止基准面以下的

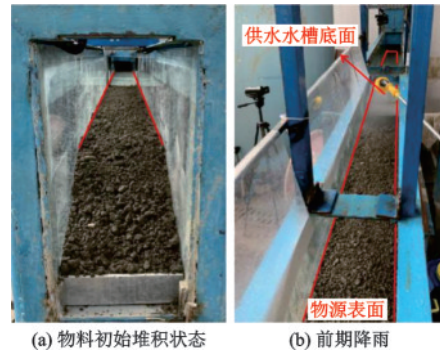


图3 实验物料照片

Fig.3 Experimental material photos

物源被冲刷带走,但不会影响基准面以上物源的冲刷过程。

1.3 实验条件

泥石流运动过程非常复杂,其运动参数主要影响因素包括流体条件(流量、流体组成等)与沟床条件(沟床纵坡、物源级配等)^[21-22]。实验选取来流流量、沟床纵坡和物料细粒含量为主控影响因素,探索流体流深、流速和容重随不同工况条件的变化特征。

来流流量大小通过动力泵控制,动力泵可控流量范围为:0~3 000 cm³/s,流量大小随动力泵开关开合程度不同而发生变化,本实验根据动力泵开关可动范围共设计6个档位,测量得到各档位对应流量分别为598、967、1 401、1 745、2 113、2 594 cm³/s。沟道模拟水槽坡度可调范围为0°~15°,为在满足泥石流暴发所需的坡度条件下探索坡度对流体运动状态的影响,在坡度可控范围内均匀地设计5组变化值,分别为5°、7°、9°、11°、13°。物料细粒含量在初始物料基础上进行等梯度筛减,设计均匀分布的4组变化值,分别为6%、9%、12%、15%。

此外,本文每次实验控制降雨模拟装置提供的模拟坡面汇流和沟道上空降雨的水体补充量保持310 cm³/s不变,实验条件明细见表1。

表1 实验条件明细

Table 1 Schedule of experimental conditions

主控因素	来流流量/(cm ³ ·s ⁻¹)	沟床纵坡/(°)	细粒含量/%
来流流量	598、967、1 401、1 745、2 113、2 594	9、11	15
沟床纵坡	1 401、2 113	5、7、9、11、13	15
细粒含量	1 401、2 113	11	6、9、12、15

1.4 实验量测参数

本实验主要对不同工况条件下流体流深、流速和容重进行观测。如图4所示,实验共选取两个观测点,为避免降雨模拟装置对流深和流速的测量造成影响,观测点应选在降雨模拟装置覆盖区域之外,故将1号观测点(1#)设置于沟道模拟水槽下游140 cm处,2号观测点(2#)设置于沟槽出口处。

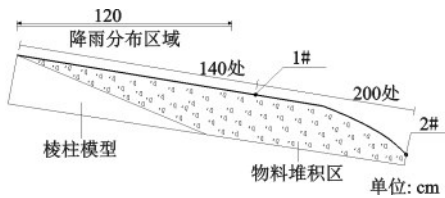


图4 观测点分布示意

Fig.4 Schematic diagram of the distribution of observation points

实验过程中,流体流深通过摄影法结合激光测距法测量。于沟道模拟水槽侧面安装索尼HDR-PJ670高速摄影机,通过影像解译流体运动过程,获取观测点处流体流深。同时,于观测点上方安装精度为1.5 mm的RLM-S30C激光测距仪,记录流体自由表面高程变化过程,将其与通过摄影测得的流体液面高程变化过程进行对比,以确保通过影像解译所得流体流深的准确性。流体流速测量采用浮标法,实验过程中于供水水槽上游不断投掷乒乓球浮标,通过影像解译浮标运动过程得到观测点处流体流速。容重通过取样法测得,流体流经沟道模拟水槽出口时,用量筒于出口处不断取样,通过水槽前方高速摄影机记录各样本的取样时刻,待实验完成后测量各样本质量和体积,计算得到沟槽出口处各时刻流体容重,将之取平均值即得当前工况条件下沟槽出口处流体容重值。流体运动参数测量的实验过程照片如图5所示。

2 实验结果分析

2.1 泥石流冲刷状态

图6~8分别是不同来流流量、沟床纵坡和物料细粒含量条件下10 s时刻泥石流冲刷状态。从图中可以看出,来流流量和沟床纵坡较小时,流体并未



(a) 流深和流速观测



(b) 流体取样

图5 实验过程照片

Fig.5 Experimental process photos

铺满整个沟床表面,而是从沟床左侧缓慢流出,出口处流体状态相对稳定,流体冲刷能力较弱。随着来流流量和沟床纵坡的增大,流体逐渐铺满沟床表面,迅速流经沟槽出口,此时流体紊动作用较强,冲刷能力随之增强;图8(a)中,沟槽出口和中段处的可移动固体物源均被大量带走,剩余物源相对较少。图8(c)中,沟槽出口处物源被大量冲刷带走,而沟槽中段剩余可移动固体物源还相对较多,说明物料细粒含量越低,流体冲刷能力越强。其原因是:物料细粒含量低时,对应孔隙度较大,过流流体能够渗透到物源内部,此时水动力作用以渗流作用和径流作用为主,促使流体冲刷能力增强。

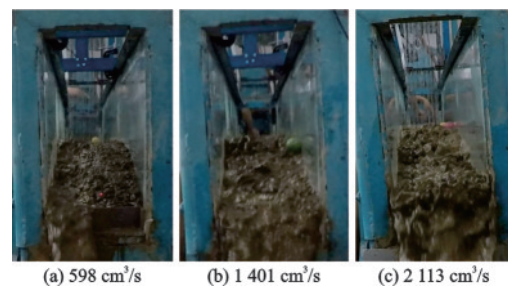


图6 不同来流流量10 s时刻流体冲刷状态正视图

Fig.6 Front view of fluid scouring state with different inflow rates at 10 s

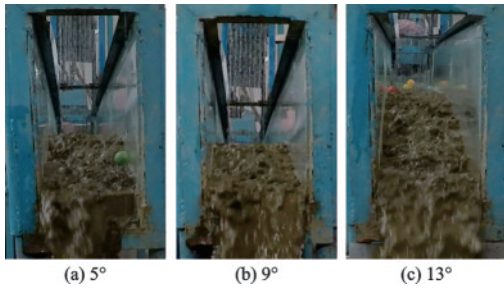


图7 不同沟床纵坡10 s时刻流体冲刷状态正视图

Fig.7 Front view of fluid scouring state in different gully beds at 10 s

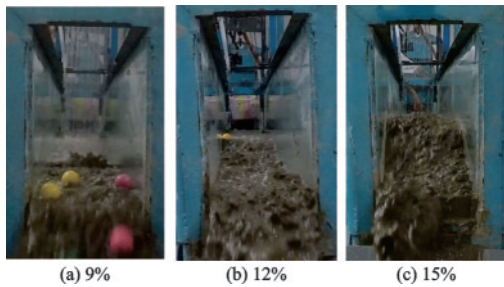


图8 不同细粒含量10 s时刻流体冲刷状态正视图

Fig.8 Front view of fluid scouring state with different fine particle content at 10 s

2.2 流深变化规律

不同沟床纵坡条件下两个观测点处流体流深与来流流量的关系如图9所示。由图9可知,无论沟床纵坡为9°还是11°,来流流量较小时,两个观测点处流体流深均较小,随着来流流量的增大,单位时间通过沟槽横截面的流体增多,对应的流深随之增大。

图10为两种不同来流流量条件下两个观测点处流深与物料细粒含量的关系。分析发现,物料细粒含量较小时,流体流深较大,随着细粒含量增加,物源孔隙度不断减小,过流流体流经物源表面时,渗透入物源内部的量减小,渗透作用减弱,致使物源被侵蚀的速率减小。同时,细粒含量的增加会增大颗粒间的黏性,使得物源更难起动,参与泥石流的物源量进一步减小,从而导致流体流深的减小。

以来流流量和物料细粒含量为自变量对实验数据进行多元非线性回归分析,得到观测点1和观测点2流深拟合式为:

$$h_1 = 0.6204q^{0.4118}\omega^{-0.1154}, R^2 = 0.8878 \quad (1)$$

$$h_2 = 1.595q^{0.2932}\omega^{-0.0878}, R^2 = 0.9054 \quad (2)$$

式中, h_1 、 h_2 分别为观测点1、2处流体流深,mm; q 为来流流量, cm^3/s ; ω 为物料细粒含量,%; R^2 为拟合

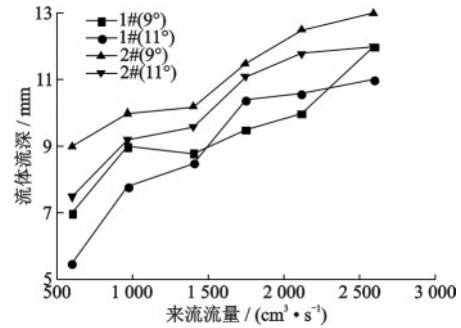


图9 流深与来流流量关系

Fig.9 Relationship between flow depth and incoming flow

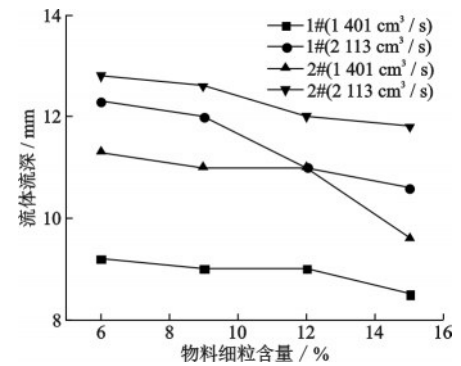


图10 流深与物料细粒含量关系

Fig.10 Relationship between flow depth and fine particle content of materials

相关系数。

观测点1、2流深拟合相关系数分别为0.8878和0.9054,拟合度较高。式(1)、式(2)中,来流流量项指数的绝对值比细粒含量项大,说明来流流量对流体流深的影响大于细粒含量。

2.3 流速变化规律

图11~13分别为流体流速与来流流量、沟床纵坡和细粒含量关系。图11表明,两种沟床纵坡条件下,来流流量较小时,两个观测点处流体流速均较小,随着来流流量不断增大,流体所具备的水动力条件会增强,流体运动至沟道各点处流速便会随之增大。

由图12可知,两种来流流量条件下,沟床纵坡较小时,流体流速较小,随着沟床纵坡增大,流体所受沿沟槽方向的动力增大,阻力减小,使得流体在运动过程中会有更多的势能转化为动能,促使流体流速增加。

从图13中可以发现,两种不同流量条件下,物料细粒含量较小时,流速较大,随着细粒含量增高,物源黏性增大,过流流体流过物源表面时,所受摩

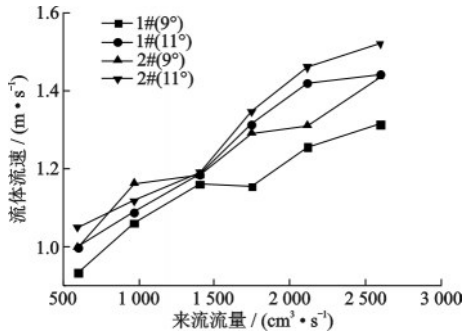


图 11 流速与来流流量关系

Fig.11 Relationship between flow velocity and influx

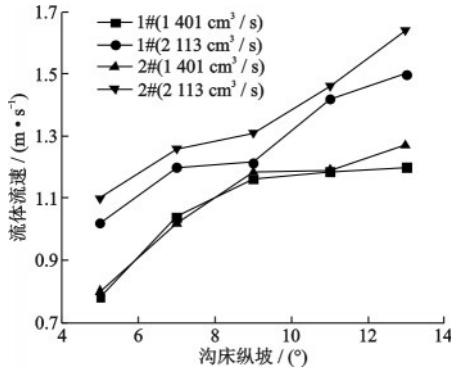


图 12 流速与沟床纵坡关系

Fig.12 Relationship between flow velocity and longitudinal slope of trench bed

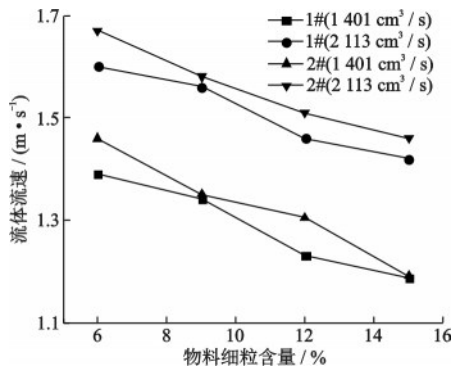


图 13 流速与物料细粒含量关系

Fig.13 Relationship between flow rate and fine particle content of materials

摩擦力越大,阻力作用越强,流体动能有被削弱的趋势,促使流体流速减小。

以来流流量、沟床纵坡正切值和物料细粒含量为自变量对实验数据进行多元非线性回归分析,得到观测点 1、2 流体流速拟合式分别为:

$$v_1 = 0.4776q^{0.281} \tan \theta^{0.3936} \omega^{-0.1673}, R^2 = 0.9713 \quad (3)$$

$$v_2 = 0.511q^{0.2725} \tan \theta^{0.3976} \omega^{-0.1484}, R^2 = 0.9611 \quad (4)$$

式中, v_1 、 v_2 分别为观测点 1、2 处流体流速, m/s; θ 为

沟床纵坡, ($^\circ$), 由于整个沟床物源会同时被冲刷, 冲刷的进行对沟床整体坡度的变化影响不大, 故以冲刷前纵坡初始值代替整个泥石流过程中的坡度值。

观测点 1、2 流速拟合相关系数分别为 0.9713 和 0.9611, 拟合度较高, 进一步表明流速与来流流量、沟床纵坡和物料细粒含量紧密相关, 与前述分析一致。式(3)、式(4)中, 沟床纵坡项指数的绝对值最大, 细粒含量项最小, 说明沟床纵坡是泥石流流速的最主要影响因素。从自然界中泥石流常暴发于地形陡峭的山谷之中也能看出沟床纵坡对泥石流运动状态的影响至关重要。

2.4 容重变化规律

图 14~16 分别为流体容重与来流流量、沟床纵坡和物料细粒含量的关系。由图 14 可知, 不同纵坡条件下, 来流流量较小时, 由于流体流速较慢, 会有更多的流体渗透入可移动固体物源内部, 对其施加渗透压力使其失稳, 此时物源所受渗透力占据主导作用, 径流力仅占次要作用, 使得固体物源在更小的径流条件下起动, 此时观测点 2 流体容重较大, 流体为黏性泥石流。随着来流流量不断增大, 流体运动至沟槽各点处的流深和流速越大, 更大的流深和流速会起动更多的可移动固体物源, 促使流体容重增加。但是, 来流流量的增加又会稀释流体, 致使流体容重减小。当被起动的固体物源的增加对流体容重增加的促进作用不足以平衡由于来流流量的增加对流体造成的稀释作用时, 流体容重便会呈现减小的趋势, 流体也会逐渐由黏性泥石流过渡为稀性泥石流。

图 15 表明, 两种不同来流流量条件下, 沟床纵坡较小时, 观测点 2 流体容重均较小, 此时流体为稀性泥石流。随着沟床纵坡不断增大, 流体运动至沟槽各点处流速增大, 所具备的冲刷能力增强。更强的冲刷能力会起动更多的可移动固体物源, 促使流体容重增加, 流体逐渐过渡为黏性泥石流。

由图 16 可知, 不同来流流量条件下, 细粒含量较小时, 物源稳定性较差, 容易被侵蚀带走, 对应观测点 2 流体容重较大, 流体为黏性泥石流。随着细粒含量不断增大, 物源孔隙度随之减小, 流体流经物源表面时渗透作用减弱, 入渗量减少, 此时物源状态相对稳定, 只有少部分物源被侵蚀带走, 致使沟槽各处流体容重减小, 流体逐渐过渡为稀性泥石流。

以来流流量、沟床纵坡正切值和物料细粒含量

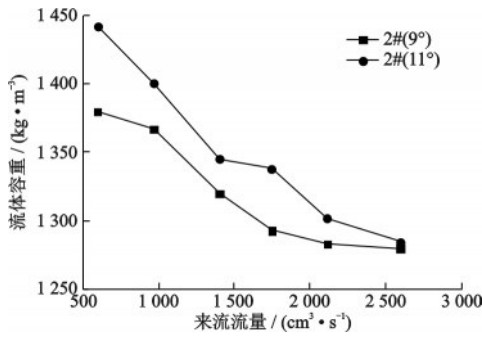


图 14 容重与来流流量关系

Fig.14 Relationship between bulk density and influx

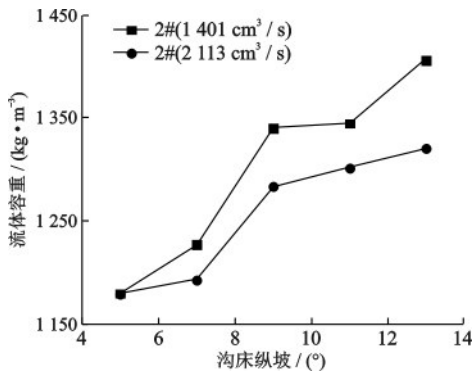


图 15 容重与沟床纵坡关系

Fig.15 Relationship between bulk density and longitudinal slope of gully bed

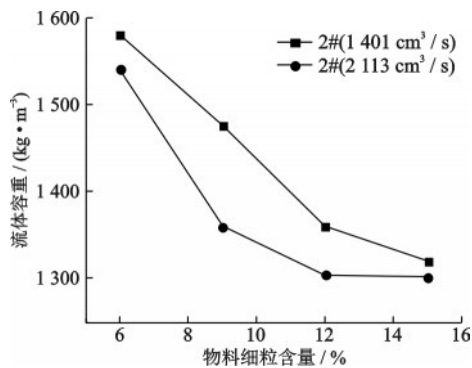


图 16 容重与物料细粒含量关系

Fig.16 Relationship between bulk density and fine particle content of materials

为自变量对实验数据进行多元非线性回归分析,得到观测点 2 容重拟合式为:

$$\gamma = 3.9698q^{-0.0592} \tan \theta^{0.1192} \omega^{-0.1756}, R^2 = 0.9202(5)$$

式中, γ 为观测点 2 流体容重, g/cm^3 。

观测点 2 容重拟合相关系数为 0.9202, 拟合度较高。拟合式中, 物料细粒含量项指数的绝对值最大, 说明物源级配条件是泥石流容重最重要的影响因素。

从上述分析可知, 来流流量主要影响泥石流流深, 沟床纵坡主要影响泥石流流速, 物源级配条件则主要影响泥石流容重。流深和流速可以表征泥石流流量, 确定泥石流活动规模, 而泥石流容重则可以反映泥石流类型。因此, 在沟床可移动固体物源充足的条件下, 流域降雨强度和地形条件是泥石流活动规模的主要影响因素, 而泥石流的类型则主要由沟床物源级配条件决定。

2.5 流量演化分析

泥石流流量可由流深和流速决定, 从上述流深、流速变化规律分析可知, 沟道固定断面泥石流流量与来流流量、沟床纵坡和沟床物源细粒含量紧密相关。同时, 随监测断面所处空间位置的不同, 泥石流流量亦不相同。因此, 可将沟道各断面流体流量表示为:

$$Q = f(q, \tan \theta, \omega, l) \quad (6)$$

式中, Q 为沟道各断面泥石流流量, m^3/s ; l 为观测断面距沟道起点的距离, m 。

根据水槽实验所得数据, 对(5)式进行多元非线性拟合, 得到沟道断面流量拟合式为:

$$Q = 3.4455q^{0.7031} \tan \theta^{0.2938} \omega^{-0.2564} l^{0.3025}, R^2 = 0.9042 \quad (7)$$

流量拟合相关系数为 0.9042, 拟合度较高。

以四川省都江堰市虹口深溪村锅圈岩沟 2013 年“7·26”泥石流为例, 对以上泥石流流量表达式进行验证。根据当地雨量监测数据, 采用 SCS 汇流模型计算得到沟口入流点峰值流量为 $4.66 m^3/s$; 采用 ARCGIS 软件对锅圈岩沟数字高程数据进行分析, 得到沟道平均坡度为 21° ; 采取锅圈岩沟物源样品进行颗粒级配分析, 得到物源细粒含量为 14%。如图 17 所示, 沟道下游 370 m 处设置有泥位监测装置, 可监测泥石流流量过程。



图 17 锅圈岩沟泥位监测装置示意

Fig.17 Schematic diagram of mud level monitoring device in Guoquanyangou

根据泥位监测装置所得数据,监测断面处“7·26”泥石流峰值流量为 $20.24\text{ m}^3/\text{s}$ 。采用式(7)对监测断面流量进行计算,来流流量以沟道入口处峰值流量代替,得到监测断面峰值流量计算值为 $23.34\text{ m}^3/\text{s}$ 。监测值与计算值之间的相对误差为15.3%,计算结果对比见表2。

结果表明,泥石流峰值流量的计算精度高于80%,计算结果与实测结果吻合情况良好,说明所得实验结论较为合理。

表2 监测结果与计算结果对比

Table 2 Comparison of monitoring results with calculation results

	峰值流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	相对误差/%
断面实测值	20.24	15.3
拟合计算值	23.34	

3 结 论

(1)来流流量和沟床纵坡越大,物源细粒含量越小时,泥石流所具备的冲刷能力越强。反之,来流流量和沟床纵坡越小,物源细粒含量越大时,泥石流冲刷能力越弱。

(2)泥石流流深随来流流量的增加而增大,随物源细粒含量的增加而减小;泥石流流速随来流流量和沟床纵坡的增加而增大,随细粒含量的增加而减小;泥石流容重则随来流流量和细粒含量的增加而减小,随沟床纵坡的增加而增大。

(3)来流流量、沟床纵坡分别是泥石流流深、流速的最主要影响因素,主要决定泥石流活动规模;物源细粒含量是泥石流容重的最主要影响因素,主要决定泥石流类型。

(4)采用实验所得泥石流流量拟合式对锅圈岩沟2013年“7·26”泥石流峰值流量进行计算,对比计算结果与实测结果,发现流量计算精度高于80%,表明所得实验结论较为合理。

致谢 感谢陈顺理老师和郑志山师兄在实验及文章撰写过程中提出的宝贵意见。感谢自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站在野外考察和观测过程中提供的支持。

参考文献:

- [1] 田密. 动床条件下泥石流阻力特性的实验研究[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2013.
Tian M. Experimental study on the resistance of debris flows over an erodible bed [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2013. (in Chinese)
- [2] 周剑, 邓茂林, 李卓骏, 等. 三峡库区杉树槽滑坡成因及视向滑动机制分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6):860-866, 883.
Zhou J, Deng M L, Li Z J, et al. Analysis on the formation and apparent-dip lateral sliding mechanism of shanshucao landslide in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6):860-866, 883. (in Chinese)
- [3] Richard M, Iverson R M, Logan M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(2):116-121.
- [4] Richard M, Iverson R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, 117 (F3):F03006.
- [5] 乔成. 考虑侵蚀影响的泥石流两相动力学模型研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2018.
Qiao C. A two-phase dynamic model of debris-flow that includes the effects of erosion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [6] 李明威, 唐川, 陈明, 等. 四川省汶川县板子沟8·20泥石流成因与易损强度分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(2):238-245.
Li M W, Tang C, Chen M, et al. Formation and vulnerability analysis for debris flow occurred on 20 August 2019 in Banzi Catchment, Wenchuan County, Sichuan Province, China [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2):238-245. (in Chinese)
- [7] 胡赵兴, 张开平, 马槽. 泥石流容重的流动还原实验法研究[C]//2015海峡两岸水土保持学术研讨会论文集. 太原:中国水土保持学会, 2015:378-382.
Hu Z X, Zhang K P, Ma C. Research on reduction experiment of debris flow density movement [C]//Proceedings of cross-strait symposium on soil and water conservation 2015. Taiyuan: Chinese Society of Soil and Water

- Conservation, 2015;378-382.(in Chinese)
- [8] 徐友宁,曹琰波,张江华,等.基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1388-1395.
Xu Y N, Cao Y B, Zhang J H, et al. Research on starting of mine debris flow based on artificial simulation experiment in Xiaoqinling gold ore area [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 28(7): 1388-1395. (in Chinese)
- [9] 庄建琦,崔鹏,胡凯衡,等.沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):230-236.
Zhuang J Q, Cui P, Hu K H, et al. Research on debris flow initiation due to bed failure after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 230-236. (in Chinese)
- [10] 杨顺,欧国强,王钧,等.恒定渗流作用下泥石流起动过程冲刷试验分析[J].岩土力学,2014,35(12):3489-3495.
Yang S, Ou G Q, Wang J, et al. Experimental analysis of scouring of debris flow initiation process under steady seepage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3489-3495. (in Chinese)
- [11] 王腾飞,姚磊华,陈爱华.暴雨条件下麻柳沟坡面泥石流形成过程试验研究[J].水文地质工程地质,2014,41(4):119-124.
Wang T F, Yao L H, Chen A H. Model test study of the Maliugou debris flow under rainstorm [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 119-124. (in Chinese)
- [12] 周必凡,胡平华,游勇,等.蒋家沟泥石流表面流速公式试验研究[J].山地研究,1991(3):38-45.
Zhou B F, Hu P H, You Y, et al. Empirical relation of surface velocity of debris flow in Jiangjia ravine [J]. Mountain Research, 1991(3): 38-45. (in Chinese)
- [13] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福,等.泥石流冲击脉动荷载概率分布特征[J].振动与冲击,2010,29(8):124-127.
Chen H K, Tang H M, Xian X F, et al. Probability distribution features of fluctuating impact force of debris flow [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 124-127. (in Chinese)
- [14] 何晓英,唐红梅,朱绣竹,等.泥石流浆体冲击特性实验研究[J].振动与冲击,2013,32(24):127-134.
He X Y, Tang H M, Zhu X Z, et al. Tests for impacting characteristics of debris flow slurry [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 127-134. (in Chinese)
- [15] 何晓英.浆体与级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性实验研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
He X Y. Experimental study on shock characteristics of debris flow considering different slurry viscosity and gradation particles [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [16] Theule J I, Liébault F, Laigle D, et al. Channel scour and fill by debris flows and bedload transport [J]. Geomorphology, 2015, 243: 92-105.
- [17] 陈华勇,胡凯衡,崔鹏,等.泥石流内部流速分布规律试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(6):77-83.
Chen H Y, Hu K H, Cui P, et al. Experimental investigation on the inner distribution of debris flow velocity [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(6): 77-83. (in Chinese)
- [18] 周必凡,李德基,罗德富,等.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991.
Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. Debris flow prevention guide [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [19] 费祥俊,舒安平.泥石流运动机理与灾害防治[M].北京:清华大学出版社,2004.
Fei X J, Su A P. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [20] 刘洋,游勇,王海帆,等.颗粒流冲击力研究现状及讨论[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):714-723.
Liu Y, You Y, Wang H F, et al. Research status and discussion on granular flow impact force [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 714-723. (in Chinese)
- [21] Zhang Sh, Zhang L M, Chen H X, et al. Changes in run-out distances of debris flows over time in the Wenchuan earthquake zone [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(2): 281-292.
- [22] 郑志山,潘华利,安笑,等.泥石流泥舌水力特性的沿程变化实验研究[J].自然灾害学报,2019,28(6):154-166.
Zheng Z S, Pan H L, An X, et al. Experimental study on spatial hydraulic characteristics of debris flow jet [J]. Journal of Natural Disaster, 2019, 28(6): 154-166. (in Chinese)

(本文责编:池营营)